

Том 34, Номер 6

ISSN 0023-4206

Ноябрь - Декабрь 1996

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главный редактор
Л.И. Седов

МАИК "НАУКА"



"НАУКА"

УДК 550.388.2

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ И СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

© 1996 г. А. М. Гоков, А. И. Гритчин

Харьковский государственный университет, Украина

Поступила в редакцию 21.02.95 г.

Экспериментально с помощью метода частичных отражений изучены характеристики квазиплановых возмущений в D-области ионосферы и вариации параметров ионосферной плазмы (плотность электронов, скорость дрейфа мелкомасштабных неоднородностей электронной плотности) во время магнитных бурь и внезапных ионосферных возмущений.

Для разработки надежной динамической модели нижней ионосферы необходимо детальное изучение пространственно-временных изменений D-области ионосферы под воздействием возмущений различной природы. Наиболее важными являются естественные источники, такие как мощные землетрясения, извержения вулканов, сильные грозы, солнечные вспышки, магнитные бури, солнечный терминатор, стратосферные потепления и т.п. Изучению этого вопроса посвящен ряд публикаций (см., например, [1, 2]). Воздействие солнечных вспышек и магнитных бурь сравнительно широко исследовано в книге [3] и ряде работ (см., например, [4–7]). Однако для решения задачи моделирования имеющихся в литературе данных о влиянии этих источников недостаточно. Поэтому необходимо проведение направленных исследований, накопление экспериментальных данных.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния солнечных вспышек (на примере внезапных ионосферных возмущений – ВИВ) и магнитных бурь (МБ) на среднеширотную D-область ионосферы, выполненных в Харьковском университете методом частичных отражений (ЧО).

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Экспериментальные исследования выполнены на аппаратуре, описанной в [8], в средних широтах вблизи г. Харькова ($\varphi = 49.5^\circ\text{N}$, $\lambda = 36.3^\circ\text{E}$). Основные параметры аппаратуры были следующие: рабочие частоты $f = 2\text{--}4$ МГц, длительность зондирующих импульсов $\tau_n = 25$ мкс с частотой повторения $F = 1\text{--}10$ Гц. Регистрация амплитуд смеси ЧО сигналов и радишумов $A_{o,n}^{c+m}(h, t)$ (h – высота над поверхностью Земли, t – время) обык-

новенной “о” и необыкновенной “н” поляризацей проводилась на перфоленту или магнитную ленту с помощью ЭВМ с 15 высотных уровней, начиная с 45 или 60 км через 3 или 6 км. Совместно с $A_{o,n}^{c+m}(h, t)$ регистрировались амплитуды радишумов $A_{o,n}^m(t)$ (в паузах между излучением зондирующих импульсов). Длительность регистраций $A_{o,n}^{c+m}(h, t)$, выполненных во время 8 солнечных вспышек в 1983–1990 гг., составляла ~10–100 мин. Отдельно рассмотрены 4 события ВИВ длительностью $\tau \leq 30$ мин и 4 ВИВ с $\tau > 30$ мин. В 1984–1987 гг. выполнены измерения $A_{o,n}^{c+m}(h, t)$ и $A_{o,n}^m(t)$ в периоды 8 магнитных бурь. В главной фазе МБ проведены непрерывные измерения в течение нескольких часов. До и после МБ в течение ряда дней (> 10) выполнены измерения длительностью $\tau_1 = 10\text{--}20$ мин при фиксированных зенитных углах Солнца χ .

Для получения параметров ионосферы (плотности электронов N , скоростей дрейфа V мелкомасштабных неоднородностей плотности и др.) после усреднения за 10 мин вычислялись

средние интенсивности ЧО сигналов $\overline{(A_{o,n}^c)^2}(h, t) =$

$\overline{(A_{o,n}^{c+m})^2} - \overline{(A_{o,n}^m)^2}$ (черта сверху здесь и далее

означает усреднение). Расчет высотных профилей $N(h)$ и $V(h)$ с погрешностью $\leq 30\%$ выполнен по известным методикам [9] и [10] соответственно. Спектральная обработка массивов $A_{o,n}^{c+m}(h, t)$ и $A_{o,n}^m(t)$ проводилась по методу Фурье [11].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Солнечные вспышки. Влияние солнечных вспышек на D-область ионосферы и характеристики ЧО сигналов исследованы нами на примере ВИБ. Проанализированы изменения $A_{\alpha, n}^m(t)$, $A_{\alpha, n}^{c+m}(h, t)$ (а также их статистических характеристик) и параметров D-области во время 8 ВИБ (отдельно рассматривались 4 события ВИБ длительностью $\tau \leq 30$ мин и $\tau > 30$ мин). Анализ $A_{\alpha, n}^{c+m}(h, t)$ и $A_{\alpha, n}^m(t)$ показал, что во время коротких ВИБ ($\tau \leq 30$ мин) и примерно в течение 10–20 мин после него наблюдаются квазипериодические затухающие изменения $A_{\alpha, n}^{c+m}(h, t)$ и $A_{\alpha, n}^m(t)$. На рис. 1а приведен пример таких измене-

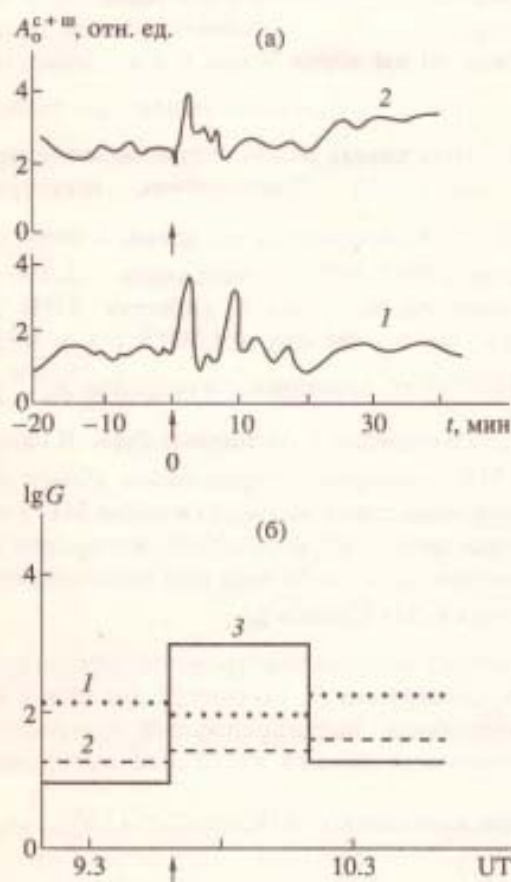


Рис. 1. Временные изменения амплитуд смеси ЧО сигнала и радишума ($h = 81$ км) (а) во время короткого ($\tau \leq 30$ мин; кривая 1) 16.X.1987 г. и длительного ВИБ ($\tau > 30$ мин; кривая 2) 21.III.1990 г. и спектральных плотностей G амплитуд $A_{\alpha, n}^{c+m}(t)$ во время ВИБ 16.X.1987 (б) (кривая 1 – $T = 8.5$ мин, 2 – $T = 3.4$ мин, 3 – $T = 4.8$ мин).

Стрелками отмечено начало ВИБ.

ний $A_{\alpha, n}^{c+m}(t)$. В результате спектральной обработки массивов $A_{\alpha, n}^m(t)$ и $A_{\alpha, n}^{c+m}(h, t)$ (длительность выборок до и после события ВИБ составляла $t_1 = 30$ мин) получено, что во время ВИБ в D-области генерируются или усиливаются волновые возмущения с периодами $T \approx 5$ мин, которые затухают в течение примерно 20–25 мин. При $\tau > 30$ мин волновые возмущения выражены меньше или не отмечаются вообще. На рис. 1б приведен пример спектров для зависимости $A_{\alpha, n}^{c+m}(t)$ ($h = 81$ км), полученной в эксперименте 16.X.1987 г., где отчетливо видно увеличение во время ВИБ спектральной плотности G составляющей с периодом $T < 5$ мин ($T = 4, 8$ мин) с последующим уменьшением после события ВИБ. Возможной причиной такого поведения ЧО сигналов от неоднородностей D-области может быть генерация или усиление акустико-гравитационных волн в результате резкого усиления интенсивности рентгеновского излучения Солнца во время ВИБ. Отметим, что подобные результаты (волновые возмущения с $T \sim 5$ мин) получены в [4] по регистрациям геомагнитного поля во время ВИБ.

Интересным оказалось поведение радишумов во время ВИБ: величина $k = \overline{A_n^m} / \overline{A_0^m} > 1$ во время ВИБ, в то время как до и после него $k \approx 1$. Следует отметить, что подобное изменение k сравнительно часто наблюдалось нами и при других возмущениях как искусственных, так и естественных. Удовлетворительного объяснения этого явления пока нет.

По методике [9] вычислены высотные профили $V(h)$ скоростей дрейфа мелкомасштабных неоднородностей плотности в D-области до, в период и после ВИБ. Результаты расчетов приведены на рис. 2а; (профили $V(h)$ получены 2.X.1986 г. за 60 мин до ВИБ (кривая 1), во время ВИБ (кривые 2–4 за каждые последующие 10 мин) и после ВИБ через 60 мин (кривая 5). Видно, что во время ВИБ значения V на $h > 80$ км изменились незначительно, а на $h < 80$ км они уменьшились в 1.5–1.8 раза.

Аналогично [12] во время всех событий ВИБ нами проведено исследование природы ЧО сигналов: для 10 минутных регистраций во всем высотном диапазоне вычислены средние энергии рассеянной $|E_{\alpha, n}^p|^2(h)$ и отраженной $|E_{\alpha, n}^k|^2(h)$ составляющих ЧО сигналов и величина $\beta_{\alpha, n}^2 = |E_{\alpha, n}^k|^2(h) / |E_{\alpha, n}^p|^2(h)$. Каких-либо существенных отличий в высотновременном распределении $\beta_{\alpha, n}^2(h, t)$ во время ВИБ по сравнению с невозмущенными условиями в ионосфере и результатами работы [12] нами не обнаружено ни во время ко-

ротких, ни в период длительных ВИБ: соотношение между $E_{\alpha, n}^k$ и $E_{\alpha, n}^p$ оставалось типичным для невозмущенной D-области ионосферы, т.е. образования или усиления неоднородностей типа "резкая граница" не отмечалось.

Аналогично [7] исследованы изменения высотного профиля $N(h)$ во время ВИБ. Как и в [7], в наших измерениях отмечено заметное (в 1.5–4 раза) увеличение N на $h = 70$ –85 км во время ВИБ. Профили $N(h)$, вычисленные за каждые последующие 3–4 мин во время ВИБ, отличались как по форме, так и по значениям N (на фиксированных высотах), после события значения N в D-области, в основном, восстанавливались в течение нескольких минут примерно к тем же величинам, что и до ВИБ. Пример таких изменений $N(h)$ приведен на рис. 2б: кривые 1–3 получены во время короткого ВИБ в 12.30–12.40 LT 26.III.1986 г. через каждые 3.5 мин соответственно, кривая 4 – получена в 11.30–11.40 LT до события ВИБ. Заметим, что приведенные данные подтверждают результаты работы [7] и позволяют проводить эмпирическое моделирование.

Магнитные бури. Измерения методом ЧО выполнены во время 8 МБ: 16.XI.1984 г., 23.I.1985 г., 13.XI.1985 г., 13.XII.1985 г., 18.XII.1985 г., 13.III.1986 г., 2.X.1986 г. и 20.II.1987 г. Характерным для всех измерений во время МБ оказалось наличие интенсивных ЧО сигналов от области высот $h = 45$ –70 км, превышающих уровень шумов в 5–15 раз. Электронная концентрация на этих высотах возрастала до значений $(2$ – $8) \times 10^2 \text{ см}^{-3}$. На рис. 3а приведен пример изменений ионизации в нижней части D-области ионосферы во время двух МБ (измерения $N(h)$ выполнены при зенитном угле Солнца $\chi = 77.5^\circ$). Дополнительная ионизация на $h \approx 65$ км во время МБ, по-видимому, вызвана высыпанием заряженных частиц, а вариации $N(h)$ – изменениями их интенсивности и спектра. Сравнивая экспериментальные $N(h)$ с характерными для данного сезона невозмущенными (например, по модели [13]), оценим дополнительную скорость ионообразования Δq_i : $\Delta q_i = 1$ – $4 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ для $h = 50$ –65 км. Полагая, что на этих высотах основной вклад в Δq_i вносит ионизация высыпавшимися протонами с энергиями $E = 15$ –50 МэВ, по методике [14] оценим поток высыпавшихся частиц во время МБ: $J_p = 0.05$ – $0.12 \text{ см}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Отметим, что в ряде случаев отмечена корреляция между временными вариациями $A_{\alpha, n}^c(h, t)$, $A_{\alpha, n}^{c+m}(h, t)$ на $h = 80$ –90 км и изменениями геомагнитного поля (подобный эффект отмечен также в [15]). В эти же периоды наблюдается увеличение N до $\sim 600 \text{ см}^{-3}$ в интервале высот $h = 50$ –65 км.

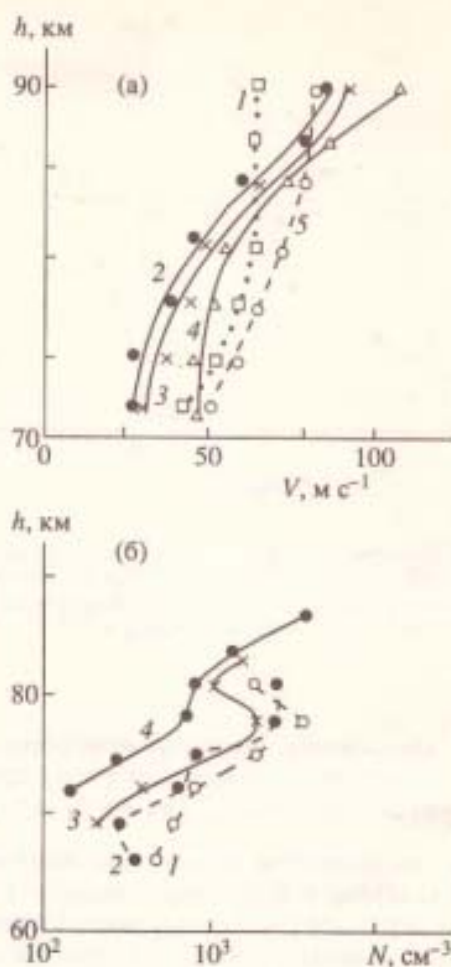


Рис. 2. Вариации параметров D-области ионосферы во время ВИБ: а – изменения скорости дрейфа мелкомасштабных неоднородностей N 2.X.1986 г. в период (кривые 2–4), до (кривая 1) и после ВИБ (кривая 5); б – изменения профилей $N(h)$ во время ВИБ 26.III.1986 г. (кривые 1–3 соответственно). Кривая 4 соответствует невозмущенным условиям.

После магнитных бурь в течение примерно 5–10 сут с высот $h \approx 55$ –65 км в 7 случаях из 8 зарегистрированы ЧО сигналы, также превышающие уровень радишумов в несколько раз. Замечено, что такие события хорошо коррелируют с высыпанием заряженных частиц из магнитосферы, которые регистрировались с помощью ИСЗ (о высыпаниях заряженных частиц в ионосферу в течение ряда дней после МБ сообщалось и в других работах, см., например, [16]). На рис. 3б приведен экспериментальный $N(h)$ -профиль (кривая 1), полученный методом ЧО в районе г. Харькова 15.VI.1983 г. ($f = 2.6 \text{ МГц}$, $\chi = 48^\circ$; в этот период времени, по данным ИСЗ Метеор, зарегистрирован поток протонов $77.2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ с энергиями $E \sim 15 \text{ МэВ}$) после МБ. Здесь же дана характерная зависимость $N(h)$ (кривая 2) в невозмущенных условиях [13], сравнение с которой позволяет

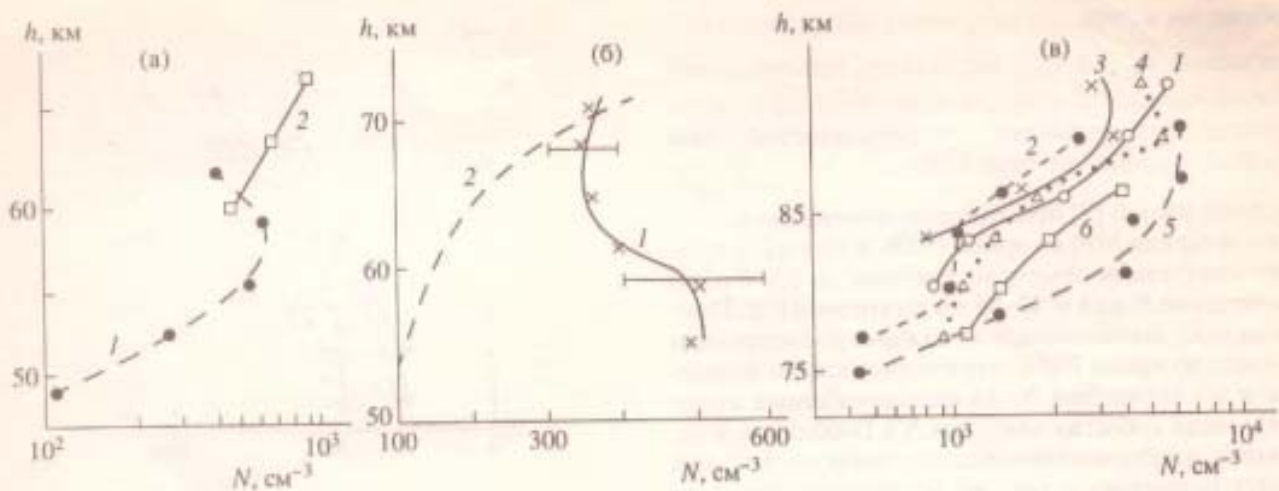


Рис. 3. Высотные профили $N(h)$ в D-области ионосферы во время МБ: а – профили получены 1 – 13.XII.1985 г., 2 – 18.XII.1985 г. при $\chi = 77.5^\circ$; б – кривая 1 получена во время высыпания протонов 15.VI.1983 г. после МБ, кривая 2 – модельный профиль; в – профили 1–4 получены 2, 4, 6 и 9.XII.1985 г. до МБ, профили 5 и 6 получены во время МБ 13 и 18.XII.1985 г. соответственно при $\chi = 78^\circ$.

оценить увеличение скорости ионообразования за счет высыпания высокоэнергичных протонов в 40–10 раз соответственно для $h = 57$ –63 км.

Нами исследованы изменения ионизации в дневной D-области ионосферы во время МБ на $h \geq 75$ км (в работе [5] сходные исследования проведены для ночных условий). На рис. 3в изображены $N(h)$ -профили в D-области на средних широтах, полученные при фиксированном $\chi = 78^\circ$ до начала МБ (кривые 1–4) и в период МБ (кривые 5, 6) в начале активного периода. Отчетливо видно, что в период МБ на $h = 78$ –90 км значения N в 1.5–6 раз больше, чем до МБ. Аналогичная кар-

тина в изменениях в D'-области на средних широтах отмечена нами и во время других МБ. Похожее изменение $N(h)$ в верхней части D-области во время МБ наблюдались в [5] в ночное время.

На рис. 4 приведены $N(h)$ -профили, полученные методом ЧО по измерениям в высоких широтах (вблизи г. Мурманска) зимой и весной 1974 г. в периоды МБ (регистрировались всплески геомагнитного поля, которые хорошо коррелировали с появлением интенсивных ЧО сигналов с высот нижней части D-области ионосферы ($h \leq 70$ км)). Характерным, как и в среднеширотных измерениях, оказалось наличие слоев повышенной ионизации на $h = 48$ –75 км с $N \leq 10^3$ см $^{-3}$. При этом в высокоширотных измерениях значения N в нижней части D-области обычно больше, чем в среднеширотных, что объясняется большей интенсивностью потоков высыпающих частиц на высоких широтах как в дневные, так и в ночные часы. Отметим, что приведенные выше результаты совместно с данными работ [3, 5] дают сравнительно ясную картину качественных и количественных изменений $N(h)$ в D-области ионосферы во время МБ, что важно для решения задач моделирования.

Следует отметить, что в периоды измерений во время МБ (как и во время ВИБ), обсуждаемых здесь, почти всегда было $k > 1$. Интересным оказалось также то, что в регистрациях ЧО сигналов во время МБ имело место одновременное существование отраженной $E_{\alpha, n}^x$ и рассеянной $E_{\alpha, n}^p$ составляющих (для $h = 75$ –85 км), причем доля $E_{\alpha, n}^x$ достигала 30%.

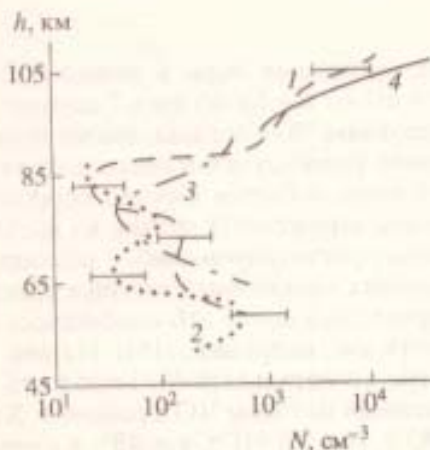


Рис. 4. Профили $N(h)$, полученные методом ЧО на высоких широтах в периоды МБ: кривые 1 – 11.II.1974 г. в 22.30 LT; 2 – 10.II.1974 г. в 14.17 LT; 3 – 22.III.1974 г. в 09.30 LT; 4 – 21.III.1974 г. в 16.47 LT.

ВЫВОДЫ

В работе экспериментально получено:

а) в периоды коротких ВИБ во время солнечных вспышек в D-области ионосферы наблюдались квазиволновые возмущения амплитуд радишумов и частично отраженных сигналов с периодами $T \leq 5$ мин, которые вызываются, вероятно, усилением или генерацией акустико-гравитационных волн;

б) в нижней части D-области ионосферы ($h \leq 70$ км) во время МБ и в течение 5–10 сут после них регистрировались слои повышенной ионизации с величинами $N \sim (2-8) \times 10^2 \text{ см}^{-3}$, которые, вероятно, обуславливаются высыпанием заряженных частиц из магнитосферы;

в) в верхней части D-области ионосферы ($h > 70$ км) электронная концентрация возрастает в 2–6 раз днем в период МБ по сравнению с невозмущенными условиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гокон А.М., Гритчин А.И., Мисюра В.А., Сомов В.Г. Развитие экспериментальных исследований естественных возмущений среднеширотной области D ионосферы методом частичных отражений // 17 конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Ч. 1. Ульяновск. 1993. С. 31.
2. Рапопорт З.Ц. Стратосферные потепления, циркуляция атмосферы и поглощение радиоволн в нижней ионосфере // Ионосферные исследования. 1989. № 47. С. 96.
3. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977.
4. Метелкин Е.В., Сорокин В.М., Федорович Г.В. О природе колебаний геомагнитного поля, генерируемых солнечными вспышками // Геомагнетизм и аэронавтика. 1982. Т. 22. № 5. С. 803.
5. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Вахирев В.Г., Гришкевич Л.В. Ночная ионизация D-области ионосферы умеренных широт в период магнитной бури // Геомагнетизм и аэронавтика. 1980. Т. 20. № 3. С. 547.
6. Gokov A.M., Gritchin A.I., Misuyra V.A., Somov V.G. Experimental investigation of natural disturbances in the middle latitudinal ionospheric D-region // Physics in Ukraine. International Conference. Kiev, 22–27 June 1993. Proceedings Contributed Papers. Plasma Physics. Kiev: Bogolubov Institute for Theoretical Physics, 1993. P. 111.
7. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гришкевич Л.В. и др. Результаты измерения электронной концентрации в D-области ионосферы во время внезапных ионосферных возмущений // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. № 8. С. 1094.
8. Гритчин А.И., Дорохов В.Л., Концевая Л.Г. и др. Стационарный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частичных отражений // Вестник Харьк. ун-та. 1988. № 318: Радиофизика и электроника. С. 21.
9. Belrose J.S., Burke M.J. Study of the lower ionosphere using partial reflections // J. Geophys. Res. 1964. V. 32. № 4. P. 2799.
10. Гокон А.М., Мисюра В.А., Пивень Л.А. и др. Исследование погрешности определения скорости дрейфа мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации нижней ионосферы по анализу амплитуд частично отраженных сигналов // Космическая наука и техника. Киев: Наукова думка, 1989. С. 65.
11. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. Вып. 2.
12. Гокон А.М., Гритчин А.И. Экспериментальные исследования некоторых механизмов, описывающих природу частично отраженных сигналов // Геомагнетизм и аэронавтика. 1993. Т. 33. № 4. С. 170.
13. Козин И.Д., Рубинштейн Б.М., Сайфутдинов М.А. и др. Адаптивная модель среднеширотной нижней ионосферы // Ионосферные исследования. 1988. № 44. С. 119.
14. Харгривс Дж.Е. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Пер. с английского. М.: Мир, 1982.
15. Дорохов В.Л., Костров Л.С., Мартыненко С.И. и др. О связи геомагнитных пульсаций с параметрами среднеширотной нижней ионосферы // Геомагнетизм и аэронавтика. 1989. Т. 29. № 1. С. 132.
16. Lauter E.A. The post-storm ionization in the upper mesosphere // J. Meteorol. 1977. № 6. P. 67.

Characteristics of Some Disturbances in the Ionospheric D-Region during Magnetic Storms and Solar Flares

A. M. Gokov and A. I. Gritchin

The characteristics of wave disturbances in the ionospheric D-region and variations of ionospheric parameters (electron density and velocity of a small irregularities) are studied by partial reflection method during magnetic storms and sudden ionospheric disturbances.